

PENGOLAHAN LINDI DENGAN METODE KOAGULASI-FLOKULASI MENGGUNAKAN KOAGULAN ALUMINIUM SULFAT DAN METODE OZONISASI UNTUK MENURUNKAN PARAMETER BOD, COD, DAN TSS (Studi Kasus Lindi TPA Jatibarang)

Nurul Fajri R^{*)}, Mochtar Hadiwidodo^{)}, Arya Rezagama^{**)}**

Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Diponegoro
Jl. Prof. H. Sudarto, SH, Tembalang, Semarang, Indonesia, 50275
email: nurulfajriramadhanii@gmail.com

Abstrak

TPA Semarang terletak di Jatibarang, Desa Kedungpane, Kecamatan Mijen dengan luas sekitar 45 hektar. TPA Jatibarang mulai beroperasi sejak Maret tahun 1992. Sampah pada TPA ini dalam proses pembusukannya menghasilkan lindi. Lindi diarahkan ke tangki penyimpanan untuk diproses lebih lanjut. Namun metode ini juga memiliki beberapa kelemahan yang paling menonjol adalah potensi pencemaran air tanah oleh air lindi. Penelitian ini akan menguji efisiensi Jatibarang TPA pengolahan lindi dengan metode koagulasi-flokulasi menggunakan koagulan aluminium sulfat dan dikombinasikan dengan proses ozonasi. Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, dosis optimum koagulan untuk pengolahan lindi TPA Jatibarang adalah 16g/L, dengan efisiensi removal parameter BOD 57%, COD sampai 61% dari dan TSS sebesar 16,0%. Setelah memperoleh dosis optimum, maka dilakukan koagulasi kembali dengan itu dosis tersebut untuk diproses oleh ozonasi. Ozon dosis optimum untuk pengolahan lindi TPA Jatibarang sebesar 60ppm. Dengan efisiensi penyisihan parameter BOD, COD dan TSS adalah 37%, 39% dan 37%. Efisiensi penyisihan untuk BOD, COD dan TSS dengan proses koagulasi-flokulasi berlanjut dengan ozonasi pada dosis 60ppm adalah 68%, 74%, 48%. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar dosis ozon yang diberikan dan semakin lama waktu, proses penyisihan senyawa organik akan lebih besar.

Kata kunci: lindi, koagulasi, flokulasi, aluminium sulfat, ozon

Abstract

[Leachate Treatment with Coagulation-Flocculation Method Using Aaluminum Sulfate as Coagulant and Ozonation Method to Decrease Parameter of BOD, COD and TSS]. Landfill of Semarang is located in Jatibarang, Mijen village, district Kedungpane with an area of approximately 45 hectares. Jatibarang landfill began operating since March 1992. Waste generation in this landfill in the decay process produces leachate. Leachate is routed to storage tanks for further processing. But this method also has some of the most prominent weakness is the potential for groundwater contamination by leachate water. This research will examine the efficiency of Jatibarang landfill leachate treatment with coagulation-flocculation method using a coagulant aluminum sulfate and combined with ozonation process. From the results of research that's been done, coagulant optimum dose for the treatment of Jatibarang landfill leachate is 16g / l, with the parameters BOD removal efficiency 24%, COD to 65% of and TSS of

16.0%. Having obtained the optimum dose, then do coagulation back with that dose for processing by ozonation. The optimum ozone dose for the treatment of Jatibarang landfill leachate amounted 60ppm. With the removal efficiency parameters BOD, COD and TSS was 46%, 48% and 37%. Efficient allowance for BOD, COD and TSS with coagulation-flocculation processing continues with ozonation at a dose of 60ppm was 55%, 76%, 48%. This shows that the greater the ozone dose given and the longer the processing time allowance organic compounds will be greater.

Keywords : leachate, aluminum sulfat, ozon

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Landfilling adalah metode yang paling banyak digunakan untuk pembuangan limbah padat perkotaan. Selama periode ini, limbah padat mengalami perubahan fisika-kimia dan biologis, ekstraksi yaitu fisik, proses hidrolisis dan fermentasi bahan organik yang membusuk. Lindi yang terdiri dari bahan organik, ion anorganik dan logam berat adalah produk sampingan dari proses ini. Karakteristik lindi bervariasi dari waktu ke waktu tergantung banyak faktor, seperti : jenis limbah di TPA, metode mengisi, tingkat pemadatan, variasi curah hujan musiman, dan tahap stabilisasi limbah (Ince et al. 2010).

Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Kota Semarang terletak di Jatibarang Kecamatan Mijen Kelurahan Kedungpane dengan luas kurang lebih 45 Ha. Berdasarkan hasil peninjauan lapangan, TPA Jatibarang masih belum optimal dalam melakukan pengolahan, bisa dilihat dari indikasi yang dialirkan melalui saluran alami yang terbuat dari tanah dan aerator IPAL yang tidak berfungsi. Lindi yang tidak terolah dengan baik ini dapat mencemari tanah dan sungai Kreo yang dijadikan pembuangan effluent.

Metode pengolahan lindi dapat dibagi menjadi pengolahan biologis dan pengolahan fisik/kimia. Dibandingkan dengan pengolahan biologis, pengolahan fisikokimia biasanya lebih efektif biaya dan dapat diselesaikan dengan waktu yang lebih singkat. Metode pengolahan fisikokimia yang paling umum diantaranya koagulasi - flokulasi, adsorpsi, proses membran dan oksidasi (Ali et al. 2016).

Menurut Lee dalam (Dom et al. 2007) koagulasi adalah proses yang sering digunakan pada pengolahan air/air limbah, pada pengolahan ini senyawa seperti garam aluminium ditambahkan ke limbah untuk mendestabilisasi bahan koloid dan menyebabkan partikel kecil menggumpal menjadi gumpalan yang lebih besar dan dapat mengendap. Efektivitas proses ini akan tergantung pada agen koagulasi digunakan, dosis, pH larutan, konsentrasi dan sifat senyawa organik yang ada dalam air.

Ozon merupakan bahan kimia yang sangat reaktif digunakan dalam pengolahan limbah sebagai desinfeksi, menghilangkan warna, degradasi dari mikropolutan organik (Parakeva dan Graham dalam (Ali et al. 2016). Proses ozon tunggal, oksidasi dengan ozon tidaklah efektif, karena kompleksitas

komposisi lindi, dosis ozon yang tinggi, dan reaksi masing-masing, mungkin memerlukan waktu lebih lama, sehingga proses ini tidak menguntungkan secara ekonomi. Sehingga dilakukan kombinasi koagulasi-flokulasi dengan ozonasi (Ntampou & Zouboulis 2006).

Pada penelitian ini akan mengkaji mengenai efisiensi pengolahan lindi TPA Jatibarang dengan metode koagulasi-flokulasi menggunakan koagulan aluminium sulfat dan dikombinasikan dengan proses ozonasi. Diharapkan dengan penelitian ini dapat melakukan pengolahan lindi yang memenuhi baku mutu air limbah dan dapat diterapkan oleh TPA Jatibarang terutama untuk penyisihan BOD, COD, dan TSS.

KAJIAN PUSTAKA

Lindi

Lindi didefinisikan sebagai limbah air yang dihasilkan akibat dari perkolasi air hujan melalui timbulan sampah, proses biokimia dalam sel sampah dan kadar air yang melekat dari sampah sendiri. Lindi biasanya mengandung banyak materi organik (biodegradable, tetapi juga tahan api untuk biodegradasi), amonia-nitrogen ($\text{NH}_4^+ \text{N}$), logam berat, diklorinasi organik dan garam anorganik, yang beracun untuk organisme hidup dan ekosistem. Lindi TPA telah diidentifikasi sebagai potensi sumber kontaminasi tanah dan air permukaan, karena mungkin meresap melalui tanah dan lapisan bawah tanah, menyebabkan kontaminasi sungai, anak sungai dan air sumur, jika tidak dikumpulkan secara benar, diolah dan aman dibuang (Li et al. 2010).

BOD

Biological Oxygen Demand (BOD) atau jumlah oksigen yang dibutuhkan oleh bakteri untuk menguraikan (mengoksidasikan) hampir semua zat organik yang terlarut dan sebagian zat-zat organik yang tersuspensi dalam air. Pemeriksaan BOD diperlukan untuk menentukan beban pencemaran akibat air buangan penduduk dan industri, dan untuk mendisain sistem-sistem pengolahan biologis bagi air yang tercemar tersebut. Penguraian zat organik adalah peristiwa alamiah; kalau sesuatu badan air dcemari oleh zat organik, bakteri dapat menghabiskan oksigen terlarut, dalam air selama proses oksidasi tersebut bisa mengakibatkan kematian ikan-ikan dalam aor dan keadaan menjadi annaerobik dan dapat menimbulkan bau busuk pada air (Alaerts & Santika 1984).

COD

Chemical Oxygen Demand (COD) atau kebutuhan oksigen kimia (KOK) adalah jumlah oksigen (mg O_2) yang dibutuhkan untuk mengoksidasi zat-zat organik yang ada dalam satu liter sampel air, dimana pengoksidanya adalah $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ digunakan sebagai sumber oksigen (oxidizing agent). Angka COD merupakan ukuran bagi pencemaran air oleh zat-zat organik yang secara alamiah dapat dioksidasi melalui proses mikrobiologis dan mengakibatkan berkurangnya oksigen terlarut di dalam air. Prinsip analisa COD yaitu sebagian besar zat organik melalui tes COD, dioksidasi oleh $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ dalam keadaan asam yang mendidih optimum serta penambahan perak sulfat (Ag_2SO_4) sebagai katalisator untuk mempercepat reaksi, seperti

persamaan berikut (Alaerts & Santika 1984)

TSS

TSS atau Total Suspended Solid merupakan total padatan tersuspensi dalam air, umumnya dinyatakan sebagai konsentrasi dalam bentuk milligram per liter. Singkatnya, untuk melakukan prosedur tes TSS, sampel diukur tercampur dituangkan ke alat filtrasi dan dengan bantuan pompa vakum atau aspirator, dihisap melalui saringan. Setelah penyaringan, filter dikeringkan pada 103 untuk 105°C, didinginkan dan ditimbang kembali. Peningkatan berat filter dan padatan dibandingkan dengan filternya sendiri merupakan nilai TSS (Spellman & Frank 2003).

Koagulasi Flokulasi

Koagulasi melibatkan penambahan koagulan kimia atau koagulan untuk tujuan pengkondisian suspensi, koloid, dan materi terlarut untuk diproses selanjutnya oleh flokulasi atau untuk menciptakan kondisi yang akan memungkinkan untuk penghapusan partikulat berikutnya dan dilarutkan. Flokulasi adalah agregasi partikel stabil (partikel yang mana muatan permukaan listrik telah berkurang) dan produk endapan yang dibentuk oleh penambahan koagulan menjadi partikel yang lebih besar yang dikenal sebagai partikel flokulan atau, lebih umum, "flok." Suatu Flok diagregasikan kemudian dapat dihilangkan dengan gravitasi sedimentasi dan/atau filtrasi (Crittenden et al. 2012).

Aluminium Sulfat

Menurut Eckenfelder (2000), Koagulan yang paling populer dalam pengolahan air limbah adalah

aluminum sulfat, atau alum $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O]$, dimana dapat diperoleh dalam bentuk padatan maupun cairan. Proses pengolahan limbah dengan penambahan koagulan alum didasarkan pada kemampuan alum yang dapat membentuk inti floks yang dapat mengikat ion-ion logam yang ada didalam limbah pada suasana basa.

Ozonasi

Ozon adalah molekul yang terdiri dari 3 atom oksigen, ditemukan oleh Van Marum pada tahun 1785 dengan menggunakan peralatan listrik. Ozon mempunyai berat molekul 48g per mol, tidak berwarna pada temperatur kamar, dan berupa cairan biru tua pada keadaan tekanan tinggi. (Bicknel & Jain, 2002 dalam (Nugroho & Ikbali, 2005).

Ozon dapat bereaksi dengan zat dalam dua cara yang berbeda, langsung dan tidak langsung. dua jalur reaksi tersebut menyebabkan produk oksidasi yang berbeda dan dikendalikan oleh berbagai jenis kinetika. Reaksi ozon tidak langsung dapat menghasilkan radikal hidroksil yang kemudian bereaksi dengan senyawa.

Jalur reaksi tidak langsung melibatkan radikal, yang merupakan molekul yang memiliki elektron tidak berpasangan. Elektron tidak berpasangan diwakili dengan " \bullet " di samping struktur kimia. Kebanyakan radikal yang sangat tidak stabil dan segera menjalani reaksi dengan molekul lain untuk mendapatkan elektron yang hilang.

Mekanisme rantai radikal ozon dapat dibagi menjadi tiga langkah yang berbeda, inisiasi, perambatan (propagasi) rantai, dan penghentian (terminasi). Langkah pertama adalah

peluruhan ozon, dipercepat oleh pemrakarsa, misalnya, OH^\cdot , untuk membentuk oksidan sekunder seperti radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$). Mereka bereaksi nonselektif dan segera ($k = 10^8 - 10^{10} \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$) dengan molekul target. Misalnya, radikal hidroksil mendapatkan kembali elektron yang hilang dengan menghilangkan elektron hidrogen dari molekul target untuk membentuk molekul air. Dalam kehilangan elektron, target molekul itu sendiri menjadi radikal, yang akan bereaksi lebih lanjut, menyebarkan reaksi berantai. Namun, jika sebaliknya bereaksi radikal dengan kedua radikal, dengan demikian, masing-masing pasangan elektron tidak berpasangan, reaksi berantai dihentikan. Radikal tersebut dinetralkan sama lain.

Oksidasi langsung ($\text{M} + \text{O}_3$) dari komponen organik dengan ozon adalah reaksi selektif dengan konstanta laju reaksi lambat, biasanya berada di kisaran ($k_D = 1,0 - 10^6 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$). Molekul ozon bereaksi dengan ikatan tak jenuh karena struktur dipolar dan mengarah ke pemisahan dari ikatan, yang didasarkan pada apa yang disebut mekanisme Criegee. Mekanisme Criegee sendiri dikembangkan untuk larutan tak berair. Jalur radikal sangat kompleks dan dipengaruhi oleh banyak zat. Reaksi utama dan produk reaksi dari jalur radikal didasarkan pada dua model yang paling penting dibahas atas (Gottschalk et al. 2000).

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan pada Juni-Agustus 2016. Pengambilan sampel lindi di TPA Jatibarang., sedangkan penelitian ozonisasi dilakukan di Laboratorium Plasma

Jurusan Fisika Universitas Diponegoro sementara penelitian koagulasi-flokulasi dan analisa BOD, COD, dan TSS dilakukan di Laboratorium Teknik Lingkungan Universitas Diponegoro

Langkah awal yang dilakukan adalah melakukan jarrest untuk mendapatkan dosis optimum koagulan. Proses koagulasi dilakukan selama 1 menit dengan kecepatan 200rpm, dan koagulasi selama 15 menit dengan kecepatan 45rpm. Variasi dosis yang dibubuhkan adalah 12g/l, 14g/l, 16g/l, dan 18g/l. Setelah dilakukan jarrest, diambil sampelnya untuk diujikan nilai BOD, COD, TSS, dan pH nya. Kemudian dilakukan analisa untuk mendapatkan dosis optimum, setelah diketahui dosis optimum, kemudian dilakukan lagi koagulasi-flokulasi dengan dosis tersebut untuk selanjutnya dilakukan pengolahan dengan ozonasi. Variasi dosis ozon yang digunakan adalah 20ppm, 40ppm, dan 60ppm dengan laju alir 2lpm. Sementara waktu pengambilan sampel yaitu pada menit ke 15, 30, 60, 90, 120, 150, dan 180.

Ozon pada penelitian ini dibangkitkan menggunakan rektor DBD, dengan konfigurasi kawat spiral-silinder. Reaktor terdiri dari elektroda dalam (positif), tabung pyrex dan elektroda luar (negatif). Elektroda spiral terbuat dari kawat tembaga, elektroda spiral dimasukkan ke dalam suatu penghalang dielektrik yaitu tabung pyrex dan pada bagian luar dari penghalang dielektrik akan diselubungi dengan lempeng tembaga.

PEMBAHASAN

Karakteristik Awal Lindi TPA Jatibarang

Lindi yang belum diolah memiliki warna yang hitam pekat, dan memiliki aroma yang khas organik yang cukup menyengat. Secara fisik lindi ini terlihat terlarut sempurna karena tidak adanya endapan didasar beaker glass ini dan juga tidak ada gumpalan yang mengapung dipermukaan lindi jika dilihat dengan kasat mata kasat mata. Hasil uji karakteristik awal lindi TPA Jatibarang dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1
Hasil Uji Karakteristik Awal Lindi

No.	Parameter	Satuan	Hasil Uji	Baku Mutu
1.	BOD	mg/l	2.548	50
2.	COD	mg/l	3.309	100
3.	TSS	mg/l	375	100
4.	pH		8,38	6-9

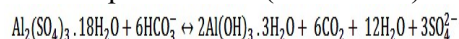
Berdasarkan tabel diatas dapat diketahui bahwa ketiga parameter BOD, COD, dan TSS belum memenuhi baku mutu menurut Perda Jateng No. 5 Tahun 2012. Tingginya nilai BOD dan COD menunjukkan tingginya kadar organik yang terkandung pada limbah. Limbah dengan nilai COD yang tinggi sangat berbahaya bagi lingkungan karena dapat menurunkan kandungan oksigen terlarut dalam air (Tchobanoglous, Burton, & Stensel, 2003). Sedangkan TSS yang tinggi akan menghambat penetrasi cahaya ke dalam air dan mengakibatkan terganggunya proses fotosintesis (Effendi, dalam estikarining 2015).

Proses Koagulasi-Flokulasi

Pada saat dilakukan jar test, terbentuk buih yang cukup tinggi. Ketinggian buih meningkat seiring bertambahnya dosis koagulan yang dibubuhkan. Selain buih, pada saat pengadukan juga terlihat terbentuknya mikroflok yang perlahan berubah menjadi makroflok

dan saat pengadukan dihentikan, flok yang terbentuk perlahan mengendap karena adanya gaya gravitasi. Setelah mengendap, buih yang terbentuk mulai berkurang dan lindi bagian atas mulai berubah menjadi jernih.

Ketika aluminum sulfat ditambahkan pada air yang mengandung alkalinitas, terjadi reaksi seperti berikut (Davis 2010) :



bahwa begitu setiap mol tawas ditambahkan menggunakan enam mol alkalinitas dan menghasilkan enam mol karbon dioksida. Reaksi di atas menggeser keseimbangan karbonat dan menurunkan pH. Namun, selama alkalinitas dan $\text{CO}_{2(g)}$ yang hadir cukup diperbolehkan untuk berkembang, pH tidak berkurang drastis dan ini umumnya bukan masalah operasional

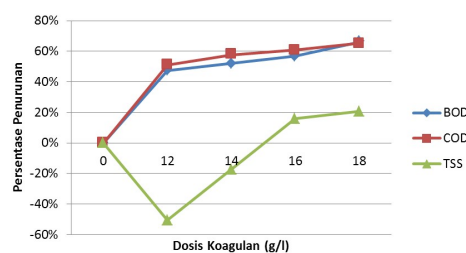
Ketika alum ditambahkan ke air, ia langsung terdisosiasi, mengakibatkan pelepasan ion aluminium dikelilingi oleh enam molekul air. Ion aluminium mulai bereaksi dengan air, membentuk $\text{Al} \cdot \text{OH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ besar yang kompleks. Beberapa peneliti berpendapat bahwa $[\text{Al}_8(\text{OH})_{20} \cdot 28\text{H}_2\text{O}]_4^+$ merupakan produk yang sebenarnya menggumpal. Terlepas dari spesies yang sebenarnya diproduksi, kompleks ini adalah endapan yang sangat besar yang menghilangkan banyak dari koloid dengan keterperangkapan karena jatuh melalui air (Davis, 2010).

Berdasarkan grafik diatas dapat dilihat bahwa seiring dengan penambahan dosis, terjadi peningkatan efisiensi penyisihan kadar ketiga parameter yang diamati. Penambahan dosis koagulan yang tinggi mendorong pembentukan flok dalam jumlah besar, karena

peningkatkan lewat jenuh dari aluminium hidroksida meningkatkan cukup laju nukleasi dibandingkan dengan tingkat pertumbuhan flock. Hasilnya adalah suspensi dengan flock yang lebih kecil dalam ukuran dan lebih besar jumlahnya, dan akan menghapus sejumlah besar bahan organik karena luas permukaan yang lebih besar tersedia untuk adsorpsi. Sebaliknya, dosis koagulan rendah mendukung pembentukan flock yang lebih besar, tetapi lebih sedikit karena tingkat pertumbuhan lebih cepat dibandingkan dengan laju nukleasi, sehingga luas permukaan yang lebih kecil tersedia untuk adsorpsi bahan organik (Dom et al. 2007).

Tabel 2
Nilai Konsentrasi pH, BOD, COD, dan TSS pada Variasi Dosis Koagulan

Dosis (g/l)	pH	BOD (mg/l)	Efisiensi %	COD (mg/l)	Efisiensi %	TSS (mg/l)	Efisiensi %
0	8,38	2.548		3.309		375	
12	6,53	1339	14%	1.622	56%	565	-51%
14	6,34	1.224	15%	1.399	62%	440	-17%
16	6,12	1.101	24%	1.291	65%	315	16%
18	5,89	963	38%	1.147	69%	298	21%
Baku mutu	6-9	50		100		100	



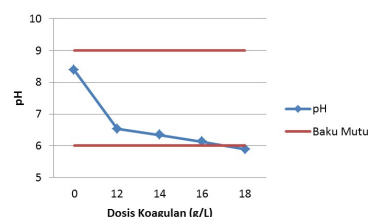
Gambar 1
Grafik Penyisihan BOD, COD, dan TSS pada Variasi Dosis Koagulan

Pengaruh pH pada penambahan dosis ini perlu dipertimbangkan, karena pH merupakan salah satu parameter yang diamati dalam Perda

Jateng No. 5 Tahun 2012 tentang Baku Mutu Air Limbah

Tabel 3
Pengaruh Dosis Terhadap pH

Dosis (g/l)	pH
0	8,38
12	6,53
14	6,34
16	6,12
18	5,89



Gambar 2
Grafik Nilai pH Hasil Koagulasi-Flokulasi

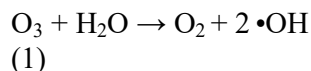
Dapat disimpulkan bahwa dosis optimum koagulan yang dapat diambil adalah 16g/L, meskipun pada dosis 18g/L memiliki penyisihan ketiga parameter lebih besar daripada dosis 16g/L, namun nilai pH yang melebihi baku mutu tidak dapat diabaikan. Sehingga pada tahap selanjutnya, dilakukan koagulasi kembali menggunakan dosis 16g/L untuk kemudian dilakukan proses ozonasi.

Pengolahan Hasil Koagulasi dengan Ozonasi

Setelah dilarutkan dalam air, ozon bereaksi dengan sejumlah besar senyawa non-biodegradable. Dalam hal ini, sifat senyawa hadir dalam lindi akan menentukan derajat reaktivitas dengan ozon dan efisiensi ozonasi. Senyawa dengan kelompok-kelompok fungsional tertentu seperti cincin aromatik dan obligasi C=C rentan terhadap serangan ozon, yang

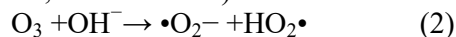
menghasilkan senyawa karbonil (Westerhoff et al., dalam Kurniawan, Lo, and Chan 2006). Dengan senyawa organik yang memiliki aromatic cincin, O_3 diketahui dapat memecah cincin, menghasilkan asam alifatik (Manoharan et al., dalam Kurniawan, Lo, & Chan 2006).

Pada rentang pH asam, ozon mengalami serangan elektrofilik selektif pada bagian tertentu dari senyawa organik yang memiliki ikatan $C = C$ dan / atau cincin aromatik (Gunten dalam Kurniawan, Lo, and Chan 2006) dan terurai menjadi asam karboksilat dan aldehida sebagai produk akhir (Ikehata & El-Din, dalam Kurniawan, Lo, & Chan 2006). Namun, saat terkena pH berkisar antara 8 sampai, dengan adanya ion OH^- , ozon cepat terurai menjadi lebih reaktif $\bullet OH$ radikal (Al-kadsi et al dalam Kurniawan, Lo, & Chan 2006), yang memiliki potensi oksidasi 2.80V.

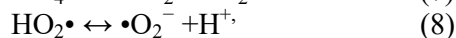
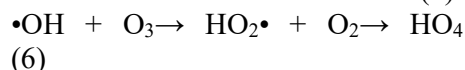
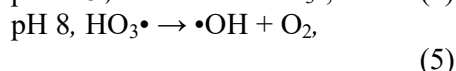
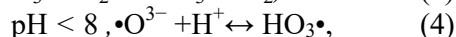
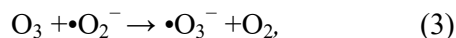


dalam lingkungan basa, banyak senyawa organik yang lambat untuk mengoksidasi, dengan ozon tersebut dapat cepat mengoksidasi dengan $\bullet OH$ radikal, yang dengan cepat menyerang sebagian besar molekul target dengan kecepatan kinetik mulai dari 10^6 sampai $10^9 M^{-1}.s^{-1}$ (Rivera & Sances dalam Kurniawan, Lo, & Chan 2006). $\bullet OH$ radikal adalah spesies yang sangat reaktif, yang dapat mengoksidasi senyawa organik dengan mineralisasi lengkap dengan karbonat sebagai produk akhir (Hoigne dalam Kurniawan, Lo, & Chan 2006)

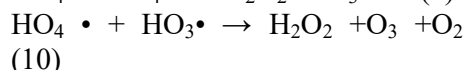
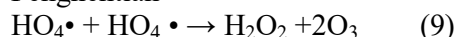
Dalam kondisi dasar, kedua OH^- dan $\bullet OH$ bertindak sebagai katalis untuk proses ozon dekomposisi menjadi senyawa antara yang juga sangat reaktif seperti ion superoksida (O_2^-) dan $HO_2 \bullet$ radikal, seperti yang ditunjukkan pada mekanisme berikut (Staehelin et al., dalam Kurniawan, Lo, & Chan 2006) : Reaksi inisiasi:



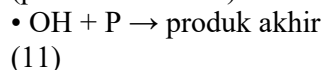
Perambatan:



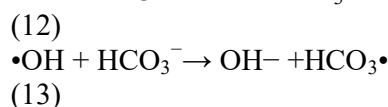
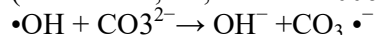
Penghentian



Namun, oksidasi melalui pembentukan $\bullet OH$ radikal dibatasi oleh adanya senyawa tahan-ozon atau *scavengers* $\bullet OH$ radikal. Jika pH lebih tinggi dari 9, ion bikarbonat dikonversi ke ion karbonat, yang merupakan *scavenger* untuk radikal $\bullet OH$ yang memperlambat laju kinetik dari reaksi oksidasi (Takeuchi et al., dalam Kurniawan, Lo, & Chan 2006) (persamaan 11-13).



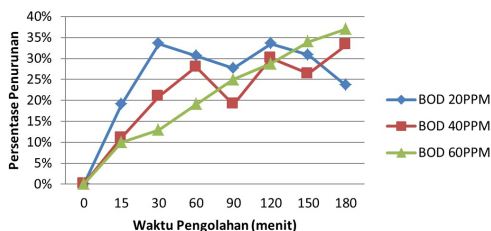
di mana P merupakan *scavengers* radikal hidroksil seperti HCO_3^- dan CO_3^{2-} . Beberapa contoh reaksi disajikan sebagai berikut (Kurniawan, Lo, & Chan 2006):



Penyisihan BOD Proses Ozonisasi

Tabel 4
Efisiensi Penyisihan BOD

Waktu pengolahan	20 ppm	Eff (%)	40 ppm	Eff (%)	60 ppm	Eff (%)
Lindi awal	2.083		1.944		1.944	
Koagulasi	1.029	51%	992	49%	992	49%
15 menit	833	19%	882	11%	893	10%
30 menit	685	33%	784	21%	863	13%
60 menit	714	31%	714	28%	804	19%
90 menit	744	28%	804	19%	744	25%
120 menit	685	33%	694	30%	706	29%
150 menit	711	31%	730	26%	655	34%
180 menit	786	24%	663	33%	625	37%
Baku mutu	50		50		50	



Gambar 3
Grafik Efisiensi Penyisihan BOD terhadap Dosis Ozon 20, 40, dan 60 ppm

Mekanisme penyisihan BOD pada proses ozonisasi terjadi reaksi langsung dan tak langsung, saat reaksi langsung, ozon langsung menyerang polutan yang ada pada lindi, reaksi selektif dengan konstanta laju reaksi lambat. Ozonisasi langsung adalah penting jika reaksi radikal yang terhambat. Seperti halnya jika air tidak mengandung senyawa yang memulai reaksi berantai (inisiator) atau jika mengandung banyak yang mengakhiri reaksi berantai sangat cepat (*scavenger*). Dengan meningkatnya konsentrasi *scavenger* mekanisme oksidasi cenderung jalur langsung. Oleh karena itu, kedua karbon anorganik serta senyawa organik memainkan peran penting.

Saat reaksi tak langsung ozon bereaksi dengan OH^- yang ada pada lindi, dan kemudian menghasilkan super anion O_2^- dan radikal hidroperoksil HO_2^\bullet (persamaan 1)

sebagai reaksi inisiasi. Reaksi selanjutnya yaitu reaksi perambatan atau reaksi rantai, pada reaksi ini OH^\bullet bereaksi dengan molekul target (persamaan 3-8). Ada beberapa zat organik yang bereaksi dengan OH^\bullet yang menghasilkan radikal kedua yang tidak menghasilkan superoksida radikal HO_2^\bullet / O_2^- . Ini merupakan penghambat (*scavenger*) yang menghentikan reaksi rantai (Gottschalk et al. 2000). Munter (2011) juga menambahkan bahwa serangan oleh OH radikal, dengan adanya oksigen, memulai kompleks kaskade reaksi oksidatif yang mengarah ke mineralisasi senyawa organik. Rute yang tepat dari reaksi ini masih belum cukup jelas. Misalnya, senyawa organik teroksidasi, pertama dioksidasi menjadi intermediet, seperti aldehid dan asam karboksilat, dan akhirnya menjadi CO_2 , H_2O , dan ion klorida. Karena CO_2 dan H_2O bukan merupakan polutan, inilah yang menyebabkan nilai BOD turun

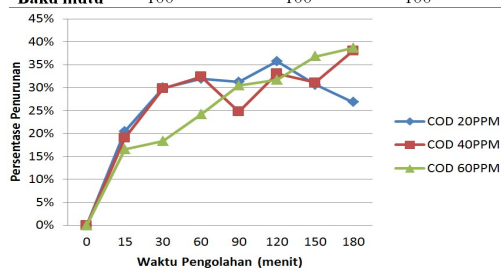
Pada gambar 3 menunjukkan bahwa penyisihan BOD mengalami fluktuasi secara keseluruhan, hal tersebut karena ozon bersifat tidak stabil dan terdekomposisi secara cepat. Penyisihan terkecil dan terbesar terjadi pada saat dosis ozon 60ppm. Penyisihan terkecil yaitu sebesar 10%, dengan waktu pengolahan 15menit. Sedangkan Penyisihan terbesar terjadi pada menit ke ke 180, yakni 37%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin besar dosis ozon, dan semakin lama waktu pengolahan, presentase penyisihan BOD juga akan semakin besar. Namun hasil penyisihan parameter BOD ini belum memenuhi Perda Jateng No. 5 Tahun 2012 tentang Baku Mutu Air Limbah

(baku mutu air limbah bagi kegiatan industri atau usaha lainnya yang belum ada baku mutunya).

Penyisihan COD Proses Ozonisasi
Mekanisme penyisihan COD pada proses ozonisasi pada prinsipnya sama dengan mekanisme penyisihan BOD, yakni terjadi reaksi langsung dan tak langsung, saat reaksi langsung, ozon langsung menyerang polutan yang ada pada lindi, reaksi selektif dengan konstanta laju reaksi lambat.

Tabel 5
Efisiensi Penyisihan COD

Waktu pengolahan	20 ppm	Eff (%)	40 ppm	Eff (%)	60 ppm	Eff (%)
Lindi awal	2.997		3.333		3.333	
Koagulasi	1.399	53%	1.408	58%	1.408	58%
15 menit	1.113	20%	1.140	19%	1.175	17%
30 menit	980	30%	988	30%	1.149	18%
60 menit	952	32%	952	32%	1.068	24%
90 menit	961	31%	1.059	25%	979	30%
120 menit	899	36%	943	33%	961	32%
150 menit	970	31%	970	31%	890	37%
180 menit	1.024	27%	872	38%	863	39%
Baku mutu	100		100		100	



Gambar 4
Grafik Efisiensi Penyisihan COD terhadap Dosis Ozon 20, 40, dan 60 ppm

Gambar 4 diatas menunjukkan terjadinya fluktuasi nilai COD seiring dengan bertambahnya dosis ozon dan waktu pengolahan. Penyisihan terkecil terjadi saat dosis ozon 60ppm pada menit ke 15 dengan presentase penyisihan yaitu 17%. Sedangkan penyisihan terbesar terjadi pada menit ke 180 saat dosis ozon 60ppm, yaitu sebesar 39%. Saat penurunan nilai COD terjadi, ini menunjukkan ozon (O_3) dapat

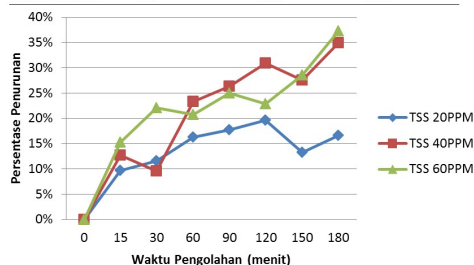
memecah sebagian ikatan dengan baik sehingga dapat menguraikan senyawa organik pada limbah. Namun hasil penyisihan parameter BOD ini belum memenuhi Perda Jateng No. 5 Tahun 2012 tentang Baku Mutu Air Limbah (baku mutu air limbah bagi kegiatan industri atau usaha lainnya yang belum ada baku mutunya).

Penyisihan TSS Proses Ozonisasi

Berdasarkan penelitian Isyuniarto, dkk dalam estikarini (2015), peningkatan penyisihan partikulat padat (TSS) dikarenakan radikal hidroksil langsung bertumbukan dengan zat organik dalam air limbah sehingga dapat mengoksidasi parameter pencemar dalam air limbah. Namun saat presentase penyisihan TTS menurun, hal ini menunjukkan ozon (O_3) belum mengikat senyawa organik lainnya karena sifat ozon (O_3) yang tidak stabil sehingga membutuhkan elektron untuk menjadi stabil.

Tabel 6
Efisiensi Penyisihan TSS

Waktu pengolahan	20 ppm	Eff (%)	40 ppm	Eff (%)	60 ppm	Eff (%)
Lindi awal						
Koagulasi	423		472		472	
15 menit	382	10%	412	13%	400	15%
30 menit	374	12%	427	10%	368	22%
60 menit	354	16%	362	23%	374	21%
90 menit	348	18%	348	26%	354	25%
120 menit	340	20%	326	31%	364	23%
150 menit	367	13%	342	28%	337	29%
180 menit	353	17%	307	35%	296	37%
Baku mutu	100		100		100	



Gambar 5
Grafik Efisiensi Penyisihan TSS
terhadap Dosis Ozon 20, 40, dan
60 ppm

Gambar 5 diatas menunjukkan terjadinya fluktuasi nilai TSS seiring dengan bertambahnya dosis ozon dan waktu pengolahan. Penyisihan terkecil terjadi saat dosis ozon 20ppm pada menit ke 15 dengan presentase penyisihan yaitu 10%. Sedangkan penyisihan terbesar terjadi pada menit ke 180 saat dosis ozon 60ppm, yaitu sebesar 37%.

Namun hasil penyisihan parameter BOD ini belum memenuhi Perda Jateng No. 5 Tahun 2012 tentang Baku Mutu Air Limbah (baku mutu air limbah bagi kegiatan industri atau usaha lainnya yang belum ada baku mutunya).

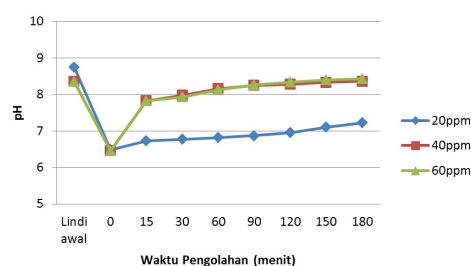
Dari pengolahan yang telah dilakukan, nilai BOD, COD, maupun TSS belum memenuhi baku mutu yang ada. Belum maksimalnya pengolahan lindi pada proses ini disebabkan oleh beban pencemar yang terlalu tinggi. Sehingga kemampuan radikal hidroksil yang terbentuk sulit untuk mendegradasi senyawa organik secara keseluruhan.

Pengaruh pH Proses Ozonisasi

Proses degradasi zat organik memiliki hubungan erat dengan kondisi pH. Penelitian terdahulu menyebutkan oksidasi *micropollutants* pada air limbah sintetis tanpa buffer akan meningkatkan nilai pH dan kecepatan reaksi (Adams, 1990; Heil et al., 1991; Gilbert, 1991 dalam C. Gottschalk, 2000). Berikut disajikan grafik pengaruh dosis terhadap pH lindi dengan variasi waktu pengolahan.

Tabel 7
Nilai pH pada Variasi Dosis Ozon
dan Waktu Pengolahan

Waktu Pengolahan	20 ppm	40 ppm	60 ppm
Lindi awal	8,74	8,35	8,35
Koagulasi	6,49	6,46	6,46
15 menit	6,73	7,83	7,83
30 menit	6,77	7,98	7,93
60 menit	6,81	8,15	8,12
90 menit	6,87	8,24	8,26
120 menit	6,96	8,28	8,34
150 menit	7,10	8,33	8,40
180 menit	7,23	8,36	8,43
Baku mutu	6-9	6-9	6-9



Gambar 6
Pengaruh pH pada Variasi Dosis
Ozon

Berdasarkan tabel 7 diatas, dapat dibuat grafik pengaruh dosis zon terhadap pH (gambar 4.6). Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa pH pada variasi dosis 20ppm cukup rendah yaitu pada rentang 6,49-7,23. Sedangkan pada dosis 40 dan 60 ppm, pH cukup tingi yaitu pada rentang 7,83-8,43. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin lama proses pengolahan, maka pH lindi akan mengalami kenaikan. Begitu pula dengan peningkatan dosis, dosis yang semakin besar, maka pH lindi pun akan lebih besar pula.

Reaksi kimia yang terjadi saat ozonasi dengan dosis 40ppm dan 60ppm pada menit 0 hingga menit ke 30 dapat dilihat pada persamaan (4), sedangkan pada menit 60 hingga menit ke 180 pada persamaan (5). Oksidasi melalui pembentukan $\bullet\text{OH}$ radikal dibatasi oleh adanya senyawa

tahan-ozon atau *scavengers* •OH radikal.

Efisiensi Penyisihan BOD, COD, dan TSS pada proses Kombinasi Koagulasi Flokulasi dan Ozonisasi

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan diketahui bahwa dosis koagulan terbaik yaitu pada dosis 16g/L. Untuk dosis ozon 20 ppm, sampel awal lindi memiliki nilai BOD 2.083 mg/L, kemudian setelah dikoagulasi turun menjadi 1.029mg/L yaitu sekitar 51% dan dilanjutkan dengan ozonasi, nilainya turun hingga 685 mg/L pada menit ke 120, namun pada menit ke 180 menjadi 786 mg/L, efisiensi penyisihannya yaitu 62%. Sedangkan COD nilai awalnya 2.997 mg/L turun menjadi 1.399mg/L setelah dikoagulasi, yaitu sekitar 53%, setelah di ozonasi turun hingga 899 mg/L pada menit ke 120, namun pada menit ke 180 1.024 mg/L yakni 66%. Untuk parameter TSS lindi memiliki nilai 490mg/L turun menjadi 423mg/L yaitu sebesar 14% setelah dikoagulasi, kemudian diozonasi turun hingga 340 mg/L pada menit 120, dan pada menit 180 memiliki nilai 353mg/L yaitu 28%.

Pada dosis ozon 40 ppm dan 60 ppm, nilai BOD awal lindi yaitu 1.944mg/L kemudian turun 49% yakni menjadi 992mg/L setelah dikoagulasikan. Kemudian setelah diozonasi 180 menit turun 66%, yaitu menjadi 663mg/L, pada dosis 40ppm, sedangkan pada dosis 60 ppm turun 68% yaitu menjadi 625mg/L. Sementara untuk parameter COD nilai awalnya yaitu 3.333mg/L turun menjadi 1.408mg/L yakni 58% setelah dikoagulasi. Pada dosis 40ppm setelah diozonasi 180menit nilai COD turun hingga 73% yaitu menjadi 872mg/L,

sedangkan dosis 60 ppm turun hingga 863mg/L yaitu sebesar 74%. Sedangkan parameter TSS awalnya 565mg/L, setelah dikoagulasi turun menjadi 472mg/L, yaitu 16%. Pada ozonasi dosis 40ppm, setelah 180 menit, turun sebesar 46% yaitu menjadi 307mg/L. Pada ozonasi dosis 60ppm, setelah 180 menit turun menjadi 296mg/L yaitu sebesar 48%.

KESIMPULAN

1. Dosis optimum koagulan alumunium sulfat untuk pengolahan lindi TPA Jatibarang adalah 16g/L, dengan efisiensi penyisihan parameter BOD sebesar 57%, COD sebesar 61% dan TSS sebesar 16%. Pada dosis 18g/L penyisihan parameter BOD, COD, dan TSS yang terjadi lebih baik, namun nilai pH turun hingga berada dibawah baku mutu. Oleh sebab itu, dosis optimum yang dipilih adalah 16g/L.
2. Karakteristik lindi yang telah dikoagulasi flokulasi dengan dosis optimum belum memenuhi standar baku mutu Peraturan Daerah Provinsi Jawa Tengah Nomor : 5 Tahun 2012 Lampiran IX Golongan I oleh karena itu diperlukan proses ozonasi sebaai lanjutannya. Hasil penelitian didapatkan bahwa presentase penyisihan terbaik saat menggunakan dosis ozon 60ppm dengan waktu pengolahan 180menit dengan efisiensi penyisihan parameter BOD, COD, dan TSS adalah 37%, 39% dan 37%.
3. Efisien penyisihan BOD, COD dan TSS dengan pengolahan koagulasi-flokulasi dengan dosis optimum koagulan dan

dilanjutkan dengan ozonasi pada dosis 60ppm pada waktu pengolahan 180menit adalah sebesar 68% , 74%, 48%. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar dosis ozon yang diberikan dan semakin lama waktu pengolahan maka penyisihan senyawa organik akan semakin besar pula.

DAFTAR PUSTAKA

- Alaerts, G; Santika. Metode Penelitian Air. 1984. Usaha Nasional: Surabaya
- Ali, Mohammad, Babak Tavakoli, Naz Chaibakhsh, and Ali Reza. 2016. "Use of a Plant-Based Coagulant in Coagulation – Ozonation Combined Treatment of Leachate from a Waste Dumping Site." *Ecological Engineering* 90: 431–37.<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.01.057>.
- Crittenden, John C et al. 2012. "Coagulation and Flocculation." In *MHW's Water Treatment Principle and Design*, Canada: Jhon Wiley & Sons.
- Davis, Mackenzie L. 2010. *Wastewater Engineering Design Principle and Practice*. New York : McGrawHill
- Dom, R, Teresa Gonz, Hector M Garc, and S Francisco. 2007. "Aluminium Sulfate as Coagulant for Highly Polluted Cork Processing Wastewaters : Removal of Organic Matter." 148: 15–21.
- Estikarini, Hutami Dinar. 2015. Penurunan kadar COD dan TSS pada limbah tekstil dengan metode ozonasi.
- Gottschalk, C, J A Libra, A Saupe, and Waste Water. 2000. *Ozonation of Water and Waste Water*. Weinheim: Wiley-Vch.
- Ince, M, E Senturk, G Onkal Engin, and B Keskinler. 2010. "Further Treatment of Landfill Leachate by Nano Filtration and Micro Filtration – PAC Hybrid Process." 255: 52–60.
- Kurniawan, Tonni Agustiono, Wai-hung Lo, and G Y S Chan. 2006. "Radicals-Catalyzed Oxidation Reactions for Degradation of Recalcitrant Compounds from Landfill Leachate." 125: 35–57.
- Li, Wei et al. 2010. "Treatment of Stabilized Landfill Leachate by the Combined Process of Coagulation / Flocculation and Powder Activated Carbon Adsorption." *DES* 264(1–2): 56–62.<http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2010.07.004>.
- Ntampou, X, and A I Zouboulis. 2006. "Appropriate Combination of Physico-Chemical Methods (Coagulation / Flocculation and Ozonation) for the Efficient Treatment of Landfill Leachates." 62: 722–30.
- Nugroho, Rudi, Ikbali. 2005. *Pengolahan Air dan Penerapan Teknologi Lingkungan*.163-172
- Spellman, Frank R, and R Frank. 2003. *Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Library of Congress Cataloging-in-Publication Data*. Florida: Lewis.